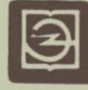
Радиотехнические электроизоляционные материалы



К. Б. Рязанов, И. С. Толмасский



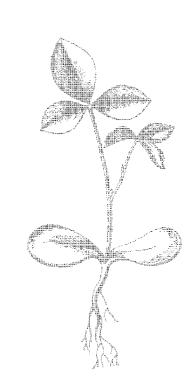
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 635

К. Б. РЯЗАНОВ и И. С. ТОЛМАССКИЙ

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1967

6Ф2.13
Р 99

УДК 621.315.4/61

Рязанов К. Б. и Толмасский И. С.

Р 99 Радиотехнические электроизоляционные материалы. М., «Энергия», 1967.

32 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 635). 50 000 экз. 10 к.

Рассматриваются свойства и применение электроизоляционных материалов, используемых в радиотехнике. Описываются явления, возникающие в диэлектриках при наложении электрического поля; объясняется физический смысл основных электрических характеристик диэлектриков. Брошюра рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

3-4-5
336-67

6Ф2.13

Рязанов Кирилл Борисович,
Толмасский Иосиф Семенович

Радиотехнические электроизоляционные материалы

Редактор *Н. Н. Грубник*
Художественный редактор *Д. И. Чернышев*
Технический редактор *Л. И. Гаврилина*
Корректор *З. Б. Шлайфер*

◆

Сдано в набор 11/I 1967 г. Подписано к печати 29/III 1967 г. Т-01849
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская мелованная
Усл. печ. л. 1,68 Уч.-изд. л. 2,19
Тираж 50 000 экз. Цена 10 коп. Зак. 38

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

◆

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В радиотехнике применяется большое количество электроизоляционных материалов (диэлектриков), предназначенных для работы в широком диапазоне частот и температур, в условиях повышенной влажности, давления, во много раз превышающего атмосферное, а также в условиях ядерной радиации.

Надежность и работоспособность радиоаппаратуры в значительной степени зависят от таких электроизоляционных свойств, как удельное объемное и поверхностное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность и др. Значения этих параметров зависят от природы диэлектрика (твердый, жидкий или газообразный), его химического состава, строения и условий эксплуатации.

Харктер этой зависимости определяется рядом физических явлений, возникающих в диэлектриках при воздействии на них электрического поля и других внешних факторов.

Поляризация диэлектриков

Поляризацией называется изменение расположения в пространстве электрически заряженных частиц диэлектрика под действием электрического поля, причем диэлектрик при этом приобретает электрический (дипольный) момент $\overline{P}$, отличный от нуля.

Суммарный дипольный момент $\overline{P}$ равен геометрической сумме моментов $\Sigma\overline{p}$ всех поляризованных молекул. Для случая плоского конденсатора

$$\overline{P} = \frac{\Sigma\overline{p}}{V},$$

где V — объем диэлектрика.

Как известно, в линейном [1] диэлектрике

$$\overline{P} = \varkappa\varepsilon_0\overline{E},$$

где $\varkappa$ — диэлектрическая восприимчивость;

ε_0 — электрическая постоянная, равная $1/8{,}86 \cdot 10^{-12}$ *ф/м*;

E — напряженность электрического поля.

---

[1] **Линейным называется диэлектрик, в котором зависимость величины суммарного дипольного момента от напряженности поля носит линейный характер.**

Электрическое смещение (электрическая индукция) в таком диэлектрике равно:

$$\overline{D} = \varepsilon_0\overline{E}\ \overline{P},$$

с другой стороны,

$$\overline{D} = \varepsilon_0\varepsilon\overline{E}.$$

Сопоставив приведенные выражения, можно найти связь между диэлектрической проницаемостью и диэлектрической восприимчивостью:

$$\varepsilon = 1 + \varkappa.$$

Очевидно, что диэлектрическая проницаемость всегда больше единицы. Используя выражение для $\overline{D}$, можно записать, что

$$\varepsilon = \frac{\overline{D}}{\varepsilon_0\overline{E}}.$$

В случае плоского конденсатора, если пренебречь искажением поля у краев электродов, $\overline{D}$ и $\overline{E}$ можно выразить через заряд Q и напряжение U.

Известно, что

$$D = \frac{Q}{S}; \quad E = \frac{U}{h}; \; Q = CU,$$

где S — площадь электродов (рис. 1); h — толщина образца; C — емкость конденсатора, равная $\varepsilon S/h$.

Емкость C_0 конденсатора с теми же размерами, но с вакуумом в качестве диэлектрика определяется по формуле

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{h}.$$

Отсюда можно сделать вывод, что в общем случае диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0},$$

т. е. ε характеризует способность диэлектрика увеличивать емкость конденсатора.

В зависимости от свойств диэлектрика вид поляризации и ее интенсивность могут иметь различный характер, а следовательно, и диэлектрическая проницаемость может принимать разные значения.

Наблюдаются следующие виды поляризации: электронная, ионная, дипольно-релаксационная, резонансная, структурная и спонтанная (самопроизвольная).

Для всех видов поляризации характерна общая закономерность смещения зарядов в частицах вещества диэлектрика и образование диполей. Процесс смещения зарядов носит временный характер и зависит от частоты приложенного поля и температуры окружающей среды.

Электронная поляризация устанавливается мгновенно в течение 10^{-15} *сек* и выражается в упругом смещении и деформации электронных оболочек и атомов. Она наблюдается на всех частотах вплоть до 10^{14}—10^{16} *гц*, протекает без рассеивания энергии и характерна для всех диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_э$ при электронной поляризации слабо зависит от температуры.

Ионная поляризация характерна для диэлектриков с ионным строением и проявляется, в дополнение к электронной поляризации, в смещении упруго связанных ионов. Она протекает в течение малых времен, порядка 10^{-13} *сек* и не сопровождается потерями энергии. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_и$ при таком виде поляризации зависит от температуры.

Дипольно-релаксационная поляризация наблюдается в диэлектриках, содержащих слабо связанные между собой заряженные частицы. Этот вид поляризации сложным образом зависит от температуры и частоты приложенного поля и сопровождается потерями энергии. Он характерен для полярных жидких диэлектриков и твердых веществ, имеющих полярные радикалы или обладающих молекулярной асимметрией.

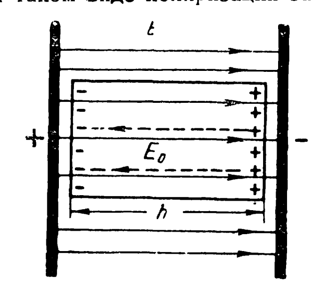


Рис. 1. Диэлектрик в электрическом поле конденсатора.

Ионно-релаксационная поляризация имеет место в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических веществах с неплотной упаковкой атомов. Она проявляется в виде избыточного переброса слабо связанных ионов в направлении поля, зависит от частоты, температуры и сопровождается потерями энергии.

Электронно-релаксационная поляризация свойственна твердым диэлектрикам на основе двуокиси титана (TiO_2). Она проявляется в ориентации по направлению поля избыточных и «дефектных» электронов или дырок, возбужденных тепловой энергией, и характеризуется температурной и частотной зависимостью и потерями энергии.

Резонансная поляризация наблюдается в диапазоне световых волн.

Структурная поляризация наблюдается в твердых телах с неоднородной структурой в диапазоне низких и средних частот. Она проявляется в перемещении свободных электронов и ионов и в эффекте высоковольтной поляризации в граничных слоях слоистых материалов и в приэлектродных слоях. Этот вид поляризации сопровождается потерями энергии и зависит от частоты и температуры.

Спонтанная поляризация характерна для сегнетоэлектриков, обладающих высоким значением диэлектрической проницаемости и нелинейной зависимостью ее от напряженности поля. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{сп}$ сегнетоэлектриков зависит от температуры и имеет при определенной температуре явно выраженный максимум. Спонтанная поляризация сопровождается значительным рассеиванием энергии.

На рис. 2 приведен график зависимости диэлектрической проницаемости от частоты, из которого видно, что различным видам поляризации соответствуют определенные значения диэлектрической проницаемости ε для соответствующего диапазона частот. По мере по-

вышения частоты отдельные виды поляризации выпадают и в интервале частот 10^{14}—10^{16} *гц* проявляется только электронная поляризация.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры при различных видах поляризации приведена на рис. 3. При электронной

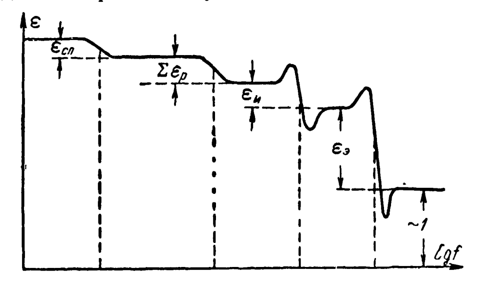


Рис. 2. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от частоты.

поляризации ε не зависит от температуры. Однако благодаря тепловому расширению вещества количество поляризующихся молекул в единице объема диэлектрика при повышении температуры уменьшается и, следовательно, уменьшается ε (кривая *а* на рис. 3).

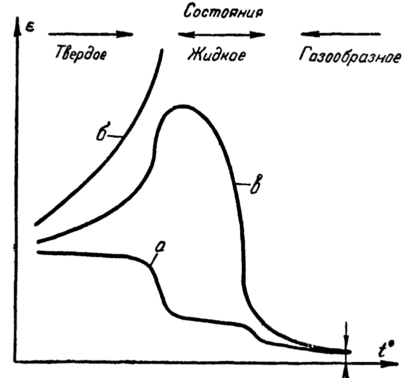


Рис. 3. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры при различных видах поляризации.

При ионной поляризации зависимость ε от температуры различна для разных материалов. Так, для неорганического стекла и для некоторых типов керамики ε с ростом температуры возрастает (кривая *б* на рис. 3). В некоторых кристаллах, где ионное смещение создает добавочное местное поле (рутил, перовскит и др.), ε с ростом температуры уменьшается.

У полярных диэлектриков при низких температурах диполи ориентированы беспорядочно. При повышении температуры вязкость диэлектрика уменьшается, что способствует ориентации диполей и возрастанию ε. При дальнейшем росте температуры усиливаются тепловые колебания молекул, что ухудшает их ориентацию. Таким образом, ε сначала возрастает до максимума, а затем убывает (кривая *в* на рис. 3).

Как уже отмечалось, процесс поляризации и значение диэлектрической проницаемости зависят от природы диэлектрика.

Газы, как правило, вследствие их низкой плотности характеризуются электронной поляризацией, и их диэлектрическая проницаемость близка к единице.

Жидкие диэлектрики в зависимости от молекулярного строения могут обладать электронной или дипольно-релаксационной поляризацией. Первый вид поляризации относится к неполярным или слабополярным жидким диэлектрикам (бензол, толуол, четыреххлористый углерод), диэлектрическая проницаемость которых лежит в пределах 2,25—2,135. Второй вид поляризации относится к полярным (глицерин, совол, кремнийорганические диэлектрики) и сильно полярным жидкостям (вода, спирт, ацетон). Их диэлектрическая проницаемость более 2,25 и для сильно полярных жидкостей достигает 80.

Кривые зависимости ε от частоты и температуры для полярных жидкостей имеют максимумы. Диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей от частоты практически не зависит, а температурная зависимость ε определяется только плотностью жидкости.

Твердые диэлектрики в зависимости от их структурных особенностей могут обладать всеми видами поляризации и различными значениями диэлектрической проницаемости.

У твердых нейтральных диэлектриков (парафин, полистирол, полиэтилен, алмаз и др), характеризующихся только электронной поляризацией, диэлектрическая проницаемость лежит в пределах 1,90—5,6. У полярных диэлектриков, характеризующихся дипольно-релаксационной поляризацией (органическое стекло, феноло-формальдегидные смолы, целлюлоза, полиамид и др.) ε меняется в пределах от 3,5 до 6,5.

У кристаллических диэлектриков ионного строения с плотной упаковкой частиц, таких как каменная соль ($NaCl$) или рутил (TiO_2), ε изменяется в широких пределах от 6 до 110.

Такие диэлектрики, как фарфор, щелочные стекла, стеатит и титанатовая керамика, в дополнение к упомянутым видам поляризации обладают и релаксационной поляризацией. Это вызывает более сложный характер частотной зависимости ε.

Электропроводность диэлектриков

При воздействии на диэлектрик электрического поля через него протекает очень малый ток, который можно фиксировать лишь очень чувствительными приборами. Этот ток можно представить в виде двух составляющих — поляризационного тока и тока сквозной проводимости.

Поляризационный ток является результатом поляризации диэлектрика. В случае электронной и ионной поляризации он протекает мгновенно и называется током смещения ($i_{см}$). Ток замедленной поляризации (релаксационной), называемый абсорбционным током ($i_{абс}$), можно фиксировать приборами и наблюдать его изменение во времени.

Ток сквозной проводимости ($i_{пр}$), иногда называемый током утечки, зависит от частоты диэлектрика.

Таким образом, ток, протекающий через диэлектрик, можно представить в виде суммы

$$i = i_{см} + i_{абс} + i_{пр}.$$

Зависимость каждой составляющей и суммарного тока от времени приложения напряжения ($\lg \tau$) приведена на рис. 4.

Электропроводность газов определяется наличием в них ионов или свободных электронов и при малых напряжениях невелика. Заметное увеличение тока наблюдается при ионизации га-

за, которая может носить характер ударной ионизации при воздействии на газ рентгеновских, ультрафиолетовых и космических лучей, радиоактивного излучения и др.

В нейтральных жидких диэлектриках электропроводность определяется только диссоциацией примесей, а в полярных — диссоциацией самих молекул. С увеличением диэлектрической проницаемости электропроводность жидкостей возрастает.

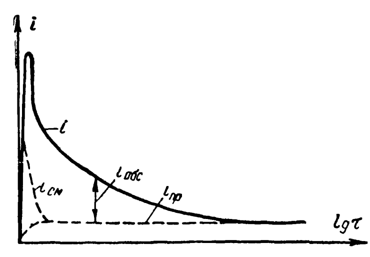


Рис. 4. Зависимость составляющих тока, протекающего через диэлектрик от времени приложения напряжения.

При повышении температуры интенсивность тепловой диссоциации жидкости возрастает и, следовательно, возрастает ее электропроводность. Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$\gamma = Ae^{-\frac{a}{T}},$$

где γ — электропроводность; T — абсолютная температура; A и a — постоянные коэффициенты, характеризующие материал.

В узком интервале температур зависимость электропроводности от температуры может быть выражена следующей формулой:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t},$$

где γ_0 и α — величины постоянные для данной жидкости.

Электропроводность твердых диэлектриков зависит от их химического состава, строения, количества примесей и может носить ионный, примесный и электронный характер.

В телах кристаллического строения с ионной решеткой наибольшая электропроводность наблюдается у кристаллов с одновалентными ионами. Электропроводность органических высокополимерных веществ зависит от их химического состава, степени полимеризации и содержания примесей. Значение электропроводности неорганических стекол определяется в основном химическим составом. Введение в состав стекол окислов тяжелых металлов вызывает уменьшение их электропроводности. Электропроводность керамических материалов может носить электронный и ионный характер.

Электронная электропроводность свойственна веществам с атомарной кристаллической решеткой и проявляется при низкой температуре. В веществах с ионными решетками при повышенной температуре наблюдается ионная электропроводность.

Зависимость электропроводности твердых диэлектриков от температуры носит экспоненциальный характер:

$$\gamma = Ae^{-\frac{b}{T}},$$

где b — постоянная, определяемая значениями энергии тепловой диссоциации и перемещения ионов. В слабых полях изменение электропроводности подчиняется закону Ома. В сильных полях, достигающих 10^5—10^6 *в/см*, наблюдается электронная электропроводность, подчиняющаяся уже закону Пуля:

$$\gamma_1 = \gamma e^{\beta E},$$

где E — напряженность поля; γ — электропроводность, подчиняющаяся закону Ома; β — коэффициент, характеризующий материал.

Наряду с указанными факторами на электропроводность твердых диэлектриков большое влияние оказывает состояние их поверхности.

Поверхностная электропроводность зависит от количества влаги на поверхности диэлектрика, его диэлектрической проницаемости и от чистоты поверхности. Чем чище поверхность диэлектрика и чем меньше его проницаемость, тем ниже поверхностная электропроводность.

Для сравнительной оценки различных диэлектрических материалов пользуются значениями удельного объемного и поверхностного сопротивлений — величинами, обратными значениям электропроводности.

Для тела с постоянным поперечным сечением S и длиной h удельное объемное сопротивление определяется формулой

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h},$$

где ρ_V — удельное объемное сопротивление, *ом · см*.

Удельное поверхностное сопротивление диэлектрика — это сопротивление участка поверхности диэлектрика между параллельными электродами длиной b, отстоящих друг от друга на расстоянии a:

$$\rho_S = R_S \frac{b}{a},$$

где ρ_S — удельное поверхностное сопротивление, *ом*.

Потери в диэлектриках

Диэлектрическими потерями называются потери мощности в диэлектрике под действием приложенного к нему напряжения. Потери в диэлектриках носят сложный характер и определяются природой вещества, его строением и составом.

В реальных диэлектриках, кроме потерь, обусловленных поляризационными токами и сквозной проводимостью, происходит рассеивание энергии за счет присутствия полупроводящих примесей в виде влаги, окислов металлов, углерода и др., а также из-за наличия газовых включений, ионизирующихся при высоком напряжении и повышенной частоте.

Аналитические выражения для диэлектрических потерь можно получить при рассмотрении эквивалентных схем диэлектрика с потерями, изображенных на рис. 5. Параметры эквивалентных схем определяются равенством мощности, рассеиваемой в рассматриваемом конденсаторе и в реальном диэлектрике, при одинаковом сдвиге фаз между током и напряжением.

Из приведенных векторных диаграмм можно получить выражения для тангенса угла диэлектрических потерь и рассеиваемой мощности. Так, для параллельной схемы замещения (рис. 5,*а*)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega C_p R};$$

$$P_a = U I_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta = \frac{U^2}{R},$$

где ω — угловая частота, *сек*$^{-1}$; C_p — емкость конденсатора, *ф*; R — сопротивление потерь, *ом*; U — напряжение, приложенное к конденсатору, *в*.

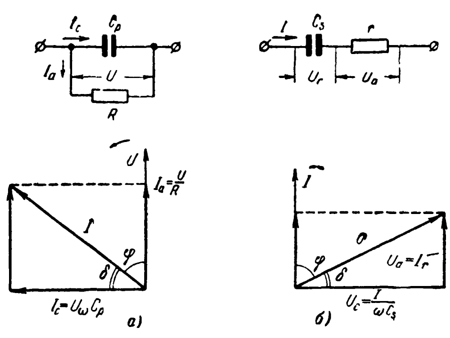


Рис. 5. Параллельная (*а*) и последовательная (*б*) эквивалентные схемы диэлектрика с потерями и векторные диаграммы для них.

Эта формула широко применяется и справедлива для любых размеров и любой формы электродов и электрического поля. Для последовательной схемы (рис. 5,*б*)

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_а}{U_c} = \omega C_s r;$$

$$P_а = IU_а = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2\delta}.$$

Между значениями емкости и сопротивления потерь для различных эквивалентных схем имеется определенное соотношение:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2\delta};$$

$$R = r\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}\right).$$

В некоторых случаях рассматриваемые выражения потерь могут быть использованы для расчета частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$. При этом выбор эквивалентной схемы должен быть обоснован физически. Если потери в диэлектрике определяются в основном сквозной проводимостью, то следует пользоваться формулами для параллельной схемы. Если же потери конденсатора определяются сопротивлением подводящих проводников и обкладок, то целесообразно воспользоваться формулами для последовательной схемы.

Потери в газах при невысоких напряжениях очень малы и определяются только их сквозной проводимостью. Тангенс угла потерь может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1{,}8\cdot 10^{12}}{\varepsilon f \rho_V},$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость; f — частота, *гц*; ρ_V — удельное объемное сопротивление, *ом · см*.

При высоких напряжениях, когда напряженность поля достигает критического значения, возникающая ионизация вызывает резкое увеличение потерь.

Потери в нейтральных жидких диэлектриках невелики и определяются только сквозной проводимостью примесей. Их величина может быть рассчитана по предыдущей формуле.

Полярные жидкости характеризуются повышенным значением потерь, обусловленных проявлением сквозной проводимости и дипольно-релаксационной поляризации. Для них характерны температурный и частотный максимум тангенса угла потерь.

Потери в твердых диэлектриках молекулярной структуры с неполярными молекулами (сера, парафин, полиэтилен, фторопласт-4 и др.) определяются только сквозной проводимостью. Они чрезвычайно малы и практически не зависят от частоты. В полярных диэлектриках проявляется дипольно-релаксационная поляризация и, следовательно, существует частотный и температурный максимум тангенса угла потерь.

В неорганических диэлектриках ионной структуры (корунд, каменная соль) потери зависят в основном от плотности упаковки ионов в решетке. В случае компактной упаковки ионов потери в области низких температур малы, а с повышением температуры возрастают за счет проявления сквозной проводимости.

В керамических материалах (фарфор, стеатит и др.), отличающихся неплотной упаковкой ионов, наблюдаются релаксационные потери, которые значительно возрастают с температурой.

Потери в стеклах определяются соотношением окислов металлов, входящих в их состав. Наличие щелочных окислов (Na_2O, K_2O) способствует увеличению потерь, а введение окислов тяжелых металлов (BaO, PbO) уменьшает тангенс угла потерь

Пробой диэлектриков

Пробой диэлектриков сопровождается резким возрастанием их проводимости и потерей, в конечном счете, изоляционных свойств.

Напряжение и напряженность электрического поля (электрическая прочность), при которых происходит пробой диэлектрика, называются пробивными:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

где $E_{\text{пр}}$ — пробивная напряженность, *кв/мм* или *кв/см*; $U_{\text{пр}}$ — пробивное напряжение, *кв*; h — толщина диэлектрика, *мм* или *см*.

Величина электрической прочности зависит от природы диэлектрика и связана с электрохимическими и тепловыми процессами, сопровождающими явление пробоя.

Пробой газов, в частности воздуха, определяется процессами ударной ионизации и фотоионизации.

Ударная ионизация возникает в том случае, если энергия, сообщаемая электрическим полем заряженной частице, значительно превышает энергию, требующуюся для ионизации нейтральной молекулы газа, т. е.

$$W = Eq\lambda_{ср} \gg W_и,$$

где E — напряженность поля; q — заряд частицы; $\lambda_{ср}$ — средняя длина пробега частицы; $W_и$ — энергия ионизации.

Для фотоионизации достаточно лишь возбуждение молекулы, сопровождаемое излучением, способствующим быстрому развитию в разрядном промежутке каналов повышенной проводимости.

Для воздуха процесс пробоя начинается при напряженности поля порядка 3 *кв/мм* (в однородном поле).

Электрическая прочность газа зависит от времени приложения напряжения, однородности поля, давления и частоты.

В однородном поле пробой наступает мгновенно и наблюдается в виде искры между электродами, переходящей при достаточной мощности в дугу.

В неоднородном поле (между остриями, острием и плоскостью, проводами, электродами антенн и др.) пробой проявляется в виде частичного разряда — короны, переходящей в искровой разряд и дугу при дальнейшем повышении напряжения. С повышением неоднородности поля $E_{пр}$ уменьшается. С уменьшением расстояния между электродами $E_{пр}$ возрастает, так как затрудняется формирование разряда. При высоком давлении $E_{пр}$ также возрастает, что объясняется уменьшением длины свободного пробега электронов. Рост $E_{пр}$ наблюдается и при очень низком давлении, так как уменьшение плотности газа снижает вероятность столкновения ионизирующих электронов с молекулами газа.

Частотная зависимость электрической прочности газов вызвана искажением поля из-за разной подвижности ионов и электронов в газе в области низких частот и малым временем для развития ударной ионизации в области радиочастот.

Пробой жидких диэлектриков может носить тепловой, ионизационный и электрический характер. Тепловой пробой происходит в жидких диэлектриках, содержащих примеси, которые при наложении высокого напряжения вызывают частичный перегрев жидкости и образование газовых мостиков.

Ионизационный пробой происходит в результате ионизации чистых жидкостей. Механизм ионизационного пробоя аналогичен пробою газов, но $E_{пр}$ при этом выше $E_{пр}$ газов, так как в этом случае свободный пробег электронов затруднен.

Электрический пробой связан с вырыванием электронов из электродов или с разрушением самих молекул жидкости.

Пробой твердых диэлектриков имеет более сложный характер, который определяется их составом, структурой и условиями эксплуатации. Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков происходит, как и в газах, за счет образования в твердом теле электронной лавины и развивается мгновенно в течение 10^{-7}—10^{-8} *сек*.

Пробой неоднородных диэлектриков, содержащих газовые включения, также носит электрическую природу, но их прочность ниже по сравнению с однородными материалами. Величина электриче-

ской прочности зависит от толщины диэлектрика. Этот вид пробоя особенно ярко наблюдается при эксплуатации керамических изоляторов на высокой частоте.

При воздействии на твердые диэлектрики высокой влажности и постоянного напряжения или напряжения низкой частоты в них возникают электрохимические процессы, приводящие к повышению электропроводности и снижению электрической прочности.

Электрохимический пробой возникает также и на высоких частотах при эксплуатации керамической изоляции, содержащей окислы металлов. При нагреве полем высокой частоты происходит восстановление этих окислов, что вызывает повышение проводимости керамики и снижение ее пробивной напряженности.

Тепловой пробой твердых диэлектриков возникает в результате нарушения равновесия между количеством тепла, выделяющегося за счет диэлектрических потерь, и тем количеством тепла, которое может рассеиваться в данных условиях. Величина пробивного напряжения при тепловом пробое зависит от частоты приложенного напряжения, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, температуры окружающей среды и нагревостойкости материала. Пробой сопровождается разогревом диэлектрика до температуры, соответствующей расплавлению, растрескиванию, обугливанию и полной потере диэлектрических свойств.

Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов должны сохраняться при воздействии на них ряда внешних факторов, из которых решающее значение имеет температура. Для сравнительной оценки качества работы диэлектриков при различных температурах вводят понятия нагревостойкости и морозостойкости.

Нагревостойкостью называют способность материала и изделий из него выдерживать кратковременное и длительное воздействие повышенной температуры без заметного ухудшения своих свойств.

Морозостойкостью называют способность материала и изделий из него противостоять пониженным температурам без заметного ухудшения своих свойств.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Большое распространение в последнее время в качестве электрической изоляции получили материалы природного, искусственного и синтетического происхождения. К ним относятся смолы, пластмассы, каучук, волокнистые материалы и др. Среди них различают низкомолекулярные и высокомолекулярные вещества, т. е. химические соединения, содержащие большие молекулы с большим количеством атомов. Многие из этих веществ являются полимерами, т. е. получаются в процессе полимеризации (соединения) более простых веществ, называемых мономерами.

Полимеры могут иметь линейное строение молекулы и пространственное или, как говорят, трехмерное строение. В последнем случае молекула имеет сильно разветвленный вид. Полимеры линейного строения преимущественно обладают хорошей гибкостью и эластичностью. Они, как правило, хорошо растворяются в растворителях, легко размягчаются и расплавляются при повышенной температуре.

Способность некоторых термопластичных полимеров образовы-

вать из расплава нити легла в основу технологии получения искусственных волокон (капрон, вискоза и др.) и пленок (полиэтилен, лавсан и др.).

Неполярные пластмассы с малыми диэлектрическими потерями

Полиэтилен — это термопластичный продукт с температурой размягчения 90—100° С и плавления 110—125° С, негигроскопичен, легко подвергается механической обработке, стоек к действию концентрированных азотной, соляной и серной кислот, щелочей и многих растворителей, исключая бензин. На практике часто для получения чистой поверхности полиэтилен протирают бензином. При этом происходит растворение тонкого поверхностного слоя, чем достигается повышенная чистота поверхности и улучшение ее диэлектрических свойств.

У полиэтилена диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь практически не изменяются в диапазоне низких и радиочастот. При этом полиэтилен сохраняет низкую величину диэлектрических потерь ($tg\ \delta \approx 0{,}0002$). Широко применяется полиэтилен в высокочастотной радиотехнике, радиолокации и технике связи (высокочастотные кабели).

Основные характеристики полиэтилена приведены в табл. 1.

Полистирол — это термопластичный материал, близкий по своим диэлектрическим свойствам к полиэтилену (см. табл. 1). Он

Таблица 1

Основные характеристики термопластичных неполярных пластмасс

Характеристики	Полиэтилен	Полистирол	Пролитетрафторэтилен (фторопласт-4)
Плотность, *г/см³*	0,95	1,05	2,3
Теплостойкость, °С	110	80	Около 300
Морозостойкость, °С	—60	—40	—195
Коэффициент теплопроводности, 10^{-4} *кал/сек·см·град*	7	1,9	8,3
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, *ом*	10^{15}	10^{15}	10^{16}
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{16}	10^{16}	10^{17}
Относительная диэлектрическая проницаемость:			
на частоте 50 *гц*	2,3	2,5	2,2
на частоте 1 *Мгц*	2,3	2,5	2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь:			
на частоте 50 *гц*	0,0002	0,0003	0,0002
на частоте 1 *Мгц*	0,0002	0,0003	0,0002
Электрическая прочность, *кв/мм*	40—150*	20—200*	25—250*

* Верхний предел указан для тонких пленочных материалов.

обладает большей твердостью, чем полиэтилен, и из него изготавливают установочные изделия, каркасы катушек индуктивности и др. Нагревостойкость его не превышает 70—80° С. Кроме того, с течением времени у полистирола наблюдается образование мельчайших трещин, что приводит к снижению его электроизоляционных свойств. Для избежания этого полистирол пластифицируют, т. е. вводят в него различные пластификаторы (каучук, метилметакрилат и др.)

Пластификаторы несколько снижают электроизоляционные свойства полистирола, однако они остаются на достаточно высоком уровне. Полистирол стоек к действию кислот (кроме концентрированной азотной) и щелочей, не стоек к действию растворителей (толуол, дихлорэтан, ацетон и др.).

Методом прессования и литья под давлением из полистирола изготавливают электроизоляционные детали, широко использующиеся в радиоэлектронике и радиотехнике.

Политетрафторэтилен (фторопласт-4) — это термопластичный материал, обладающий высокой гидрофобностью (слабым взаимодействием с водой). Он негорюч и стоек к действию кислот, щелочей и растворителей. Фторопласт-4 может работать в широком диапазоне температур (от —60 до +230° С), сохраняя при этом высокие электроизоляционные свойства В отсутствие кислорода воздуха его максимальная рабочая температура еще выше, но при этом необходимо учитывать, что при температуре около 275° С происходит довольно значительное расширение материала, а при больших температурах выделяются токсичные соединения.

Под действием механических усилий фторопласт-4 деформируется, что позволяет изготовлять из него различные изделия сложной формы. Недостатком фторопласта-4 является его хладотекучесть, что не позволяет применять его при низкой температуре в узлах, в которых имеются значительные механические напряжения.

Фторопласт-4 прекрасно поддается механической обработке. По своим электроизоляционным свойствам он является одним из лучших материалов (см. табл. 1) и широко применяется в высокочастотной технике и в технике связи. Его основные характеристики практически не меняются в диапазоне частот от 50 до 10^8 *гц*. Лишь при больших частотах (10^{10} *гц*) наблюдается небольшое увеличение диэлектрических потерь. Фторопласт-4 нашел широкое применение в качестве нагревостойкой изоляции (нагревостойкие провода и кабели и др.).

Используя гидрофобность и исключительную инертность фторопласта-4, из него часто изготавливают небольшие формочки для получения деталей из заливочных материалов (компаунды, эпоксидные смолы и др.).

Полярные пластмассы с повышенными диэлектрическими потерями

Полихлорвинил — это термопластичный материал, обладающий высокой стойкостью к действию кислот, щелочей и минеральных масел. Он частично растворяется в сложных эфирах, кетонах и хлорированных углеводородах. При воздействии влаги у него резко снижается величина удельного поверхностного сопротивления. Полихлорвинил может работать при температуре от —20 до +70° С. При добавлении в полихлорвинил пластификатора (например, трикрезилфосфата) предельная рабочая температура снижается до +50° С. Присутствие в молекуле полихлорвинила полярной группы обусловливает повышенную величину тангенса угла диэлектрических потерь (около 0,01, см. табл. 2).

Таблица 2

Основные характеристики термопластичных полярных пластмасс с повышенными диэлектрическими потерями

Характеристики	Полихлорвинил	Полиметилметакрилат (органическое стекло)	Полиамиды	Полиэтилентерефталат (лавсан)	Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)
Плотность, *г/см*³	1,5	1,2	1,2	1,4	2,2
Теплостойкость, °С	70	70	110	250	200
Морозостойкость, °С	—35 ÷ —60	—180	—40	—100	—200
Коэффициент теплопроводности, 10^{-4} *кал/сек·см·град*	2,2	5	5,8	4	1,4
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{15}	10^{16}
Относительная диэлектрическая проницаемость:					
на частоте 50 *гц*	3—5	4	5	3,5	2,3
на частоте 1 *Мгц*	3—5	3	4,5	3	2,5
Тангенс угла диэлектрических потерь:					
на частоте 50 *гц*	0,03—0,08	0,04	0,01	0,003—0,03	0,015
на частоте 1 *Мгц*	0,01—0,05	0,02	0,04	0,002—0,02	0,01
Электрическая прочность, *кв/мм*	14—20	18—35	20—35	30—140*	15—20

* Верхний предел относится к пленочному материалу.

Широкое применение полихлорвинил получил при изготовлении кабельных оболочек и в качестве электрической изоляции проводов.

На основе полихлорвинила выпускается винипласт — материал в виде листов или труб с повышенной механической прочностью по сравнению с полихлорвиниловым пластикатом. Детали из полихлорвинила хорошо свариваются. Винипласт применяется в качестве изоляционного материала там, где не требуются высокие электроизоляционные свойства.

Полиметилметакрилат, называемый часто органическим стеклом или плексигласом, представляет собой прозрачный термопластичный материал. Он достаточно тверд, хорошо механически обрабатывается, стоек к действию разбавленных кислот и щелочей, а также бензина и масел, растворяется в ароматических и хлорированных углеводородах, хорошо склеивается (например, дихлорэтаном).

Полиметилметакрилат применяется как конструкционный материал в самолетостроении, а также благодаря способности выделять большое количество газов под воздействием электрической дуги применяется в качестве дугогасящего материала в высоковольтных разрядниках и других аппаратах.

Полиамиды — это термопластичные вещества, способные образовывать нити и пленки из расплава, и обладающие высокой механической прочностью и эластичностью. К ним относится капрон, нейлон и др. Морозостойкость и нагревостойкость полиамидов не высока. Они растворяются в крезоле, в муравьиной и уксусной кислотах. Из полиамидов изготовляют изоляцию проводов, а также прессуют различные детали.

На основе полиамидов и полиэфиров создан термопластичный материал под названием полиуретан, отличающийся стойкостью к кислотам, щелочам, к воде и сохраняющий электроизоляционные

свойства при температуре до 100° С. Его характеристики аналогичны полиамидам (см. табл. 2), но он отличается высокой стабильностью параметров как при повышенной влажности, так и при повышенной температуре. Полиуретаны широко применяются для герметизации различного вида конденсаторов, а также для производства эмали самооблуживающихся проводов.

Полиэтилентерефталат, известный под названием лавсан, отличается высокой механической прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами и способностью работать в широком интервале температур (от —65 до +155° С, см. табл. 2).

Лавсан широко применяется в качестве межслойной изоляции в катушках индуктивности, трансформаторах и дросселях. При применении лавсана необходимо помнить, что под действием гидроксильных групп (OH) он разрушается. Поэтому не рекомендуется применять его в сочетании с материалами, имеющими гидроксильные группы, например с картоном, бумагой и т. п. Рекомендуется применять лавсан в сочетании со стеклотканью или другими аналогичными материалами.

Политрифторхлорэтилен — это термопластичный материал, известный под названием фторопласт-3. В отличие от фторопласта-4 он является полярным диэлектриком, чем и обусловлены его более низкие электроизоляционные свойства (см. табл. 2) и теплостойкость, но, имея более жесткую структуру, он обладает лучшими механическими свойствами.

Применяется фотопласт-3 для изготовления неответственных электроизоляционных, низкочастотных деталей, у которых допускаются повышенные потери (платы предохранителей, каркасы и т. п.).

Термореактивные пластмассы

Термореактивные пластмассы, как правило, представляют собой сложную смесь, важнейшими составными частями которой являются: смола, наполнитель (древесная мука, хлопчатобумажные или стеклянные волокна, асбест, кварцевый песок и др.), пластификатор и краситель.

В зависимости от вида применяемой смолы различают фенольно-формальдегидные пластмассы (фенопласты), крезолоформальдегидные, амино-формальдегидные и меламино-формальдегидные пластмассы (аминопласты). Вид смолы во многом определяет свойства пластмасс. Так, например, анилино-формальдегидная смола менее полярна и при прочих равных условиях пластмассы на ее основе имеют лучшие электрические свойства, чем фенопласты.

Для всех прессованных изделий, изготовленных из термореактивных пластмасс с наполнителем, характерно снижение электроизоляционных свойств после механической обработки. Это объясняется тем, что при фрезеровании или сверлении происходит разрушение тонкой поверхностной пленки чистой смолы, покрывающей снаружи прессованную деталь. Эта пленка имеет высокие электроизоляционные свойства и препятствует проникновению влаги внутрь изделия. Для сохранения высоких электроизоляционных свойств после механической обработки часто детали дополнительно пропитывают или покрывают соответствующими влагостойкими составами или лаками. Пластмассы с повышенными электроизоляционными свойствами, как правило, отличаются коричневой окраской.

В табл. 3 приводятся основные характеристики электроизоляционных свойств термореактивных пластмасс. Однако надо иметь в виду,

Таблица 3

Основные характеристики термореактивных пластмасс

Характеристики	Фенольные пластмассы (фенопласты)	Анилино-формальдегидные пластмассы	Меламино-формальдегидные пластмассы (аминопласты)
Плотность, *г/см³*	1,6	1,2	1,6
Теплостойкость, °С	100—200	110	120
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{9}—10^{14}	10^{13}	10^{10}—10^{13}
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 *Мгц*	0,1—0,5	0,0015—0,006	0,0025—0,05
Электрическая прочность, *кв/мм*	5—17	10—16	12—16

что свойства пластмасс в сильной степени зависят не только от применяемой смолы, но и от вида наполнителя. Поэтому в данной таблице отутствует значение относительной диэлектрической проницаемости, которая для всех видов пластмасс колеблется от 4 до 7. Этим же определяется и указанный предел изменений значений тангенса угла диэлектрических потерь и электрической прочности.

Пенопласты

Пенопластами называются пластмассы с газовоздушным наполнителем. В радиотехнике наибольшее распространение получили пенопласты, изготовляемые на основе полистирола (ПС), фенольно-формальдегидной смолы и каучука (ФФ и ФК), поливинилхлорида (ПХВ), кремнийорганической смолы (К-40), полиуретана (ПУ) и эпоксидной смолы.

В основе технологии изготовления пенопластов лежит метод вспенивания смол с последующим их затвердеванием. В результате образуется легкая масса с большим количеством пор. В зависимости от технологии в материале могут возникнуть либо незамкнутые, соединенные друг с другом ячейки (в этом случае материал называют пенопластом), либо замкнутые не соединенные друг с другом ячейки (в этом случае материал называют поропластом). Такая структура определяет и свойства материалов. Пенопласты обладают меньшей теплопроводностью, меньшей газо- и влагопроницаемостью и несколько тяжелее, чем поропласты.

Морозостойкость пенопластов на основе перечисленных выше смол . около —60° С. Плотность лежит в пределах от 0,03 до 0,22 *г/см³*. Электрическая прочность пенопластов низкая (2—7 *кв/мм*) из-за большого количества воздушных пор. Этим же объясняется и пониженное значение удельного объемного и поверхностного сопротивления.

Основное применение пено- и поропласты нашли в качестве звукопоглощающего и теплоизоляционного материала. Основные харак-

Таблица 4

Характеристики пенопластов

Характеристики	Пенополистиролы				Пенопласты				Пенополиуретан ПУ-101	Пенополиэпоксиды
	ПС-1	ПС-254	ПС-5 и ПС-БСТ	ПС-А	ПХВ-1	ФФ	ФК-20-ст	К-40		
Плотность, *г/см*^{3}	0,2—0,07	0,1	0,05	0,2	0,13—0,09	0,19—0,23	0,44	0,2—0,4	0,1—0,2	0,8—0,2
Коэффициент теплопроводности, 10^{-4} *кал/сек·см·град*	1,2	1,14	0,9—1,4	1,2	1,22	1,45	1,5	1,2	1,4	1,2
Теплостойкость, °С	70	70	70	70	70	110—130	110—130	300	120	100
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^{10}	10^{12}	10^{12}	10^{14}
Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 1 *Мгц*	1,1	1,1	1,1	1,4	1,6	1,3	2,8*	1,2	1,1*	1,4
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 *Мгц*	0,0005	0,0008	0,0005	0,0006	0,04	0,01	0,012*	0,003	0,0015*	0,0056

* На частоте 10 *Ггц*.

теристики наиболее распространенных марок электроизоляционных пенопластов, применяемых в радиотехнике, приведены в табл. 4.

Лаки и вазелинообразные диэлектрики

Лаки различают пропиточные, служащие для пропитки пористых изделий (обмоток, прокладок и т. п.) с целью придания им влагостойкости, повышения механической прочности и теплопроводности, и покровные, предназначенные для улучшения внешнего вида изделия и снижения поверхностных токов. Для защиты поверхности изделий часто применяют эмали, которые представляют собой лаки с введенными в них пигментами. Эмали улучшают механические свойства поверхности и придают ей определенную окраску.

Лаки разделяются на масляные, масляно-смоляные, масляно-битумные, смоляные, эфиро-целлюлозные и др. Они могут быть воздушной сушки, т. е. сохнуть на воздухе при комнатной температуре, и горячей сушки, когда для отвердевания лака необходима повышенная температура.

Масляно-битумные лаки содержат высыхающие масла и битумы. Они хорошо растворяются в ароматических углеводородах (бензол, толуол и др.). Практически в качестве растворителя используется смесь бензина с толуолом. Эти лаки применяются для пропитки катушек и трансформаторов и для наружной защиты.

Масляно-смоляные лаки отличаются от масляно-битумных повышенной теплостойкостью и клеящей способностью. Они растворяются в жидких углеводородах.

Эфиро-целлюлозные лаки (нитролаки) плохо пристают к металлам, хорошо растворяются в ацетоне, устойчивы к действию минеральных масел, бензина и влаги. Тангенс угла диэлектрических потерь нитролаков велик.

Нитролаки — это лаки воздушной сушки, они широко применяются в качестве покровных лаков, так как создают на покрываемой поверхности твердую блестящую пленку. Кроме того, их применяют как клеящие лаки в неответственных узлах радиоаппаратуры.

Полихлорвиниловые лаки применяются как покровные лаки для защиты от воздействия кислот, бензина, минеральных масел и др.

Полистирольные лаки представляют собой растворы полистирола в бензоле, толуоле или ксилоле. Они обладают хорошими электроизоляционными свойствами, влагостойкостью и применяются в виде пропиточных и клеящих лаков при изготовлении ответственных изделий высокочастотной радиоаппаратуры.

Кремнийорганические лаки воздушной сушки К-1 и М-5 имеют хорошие электроизоляционные свойства и повышенную нагревостойкость (до 250° С). Растворителем этих лаков является толуол.

Лак К-1 применяется как покровный, а также для подмазки слоев в процессе намотки катушек индуктивности. После высыхания на воздухе в течение 1—2 *ч* пленка лака приобретает блестящий вид. Сушка при температуре около 100° С повышает твердость лаковой пленки и ее влагостойкость.

Лак М-5 (полиорганосилазан) отличается повышенной влагостойкостью и малыми потерями, которые не изменяются при температурах до 150° С ($\operatorname{tg} \delta=0{,}0007$). В диапазоне радиочастот тангенс угла диэлектрических потерь практически не зависит от частоты. Лак используют для покрытия изделий и для пропитки. Кроме того, его можно использовать для склеивания металлических поверхностей

Таблица 5

Характеристики некоторых лаков

Характеристики	Масляно-битумный лак	Глифталиево-масляный лак	Кремнийорганические лаки	
			К-1	М-5
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{15}	10^{14}	10^{15}	10^{15}
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, *ом*	10^{13}	10^{12}	10^{14}	10^{14}
Относительная диэлектрическая проницаемость	3,4	3,6	3,5	3,5
Тангенс угла диэлектических потерь	0,03	0,04	0,001	0,0007
Электрическая прочность, *кв/мм*	55	70	70	80

с кремнийорганическими диэлектриками и другими материалами. Процесс отвердевания лака лучше проходит при повышенной влажности.

В табл. 5 приведены электроизоляционные свойства некоторых лаков. Для кремнийорганических лаков приведены экспериментальные данные.

Кремнийорганический вазелин КВ-3 — это продукт на основе кремнийорганической жидкости. Наполнителем в нем служит белая сажа (мелкодисперсный кварцевый песок). По вязкости кремнийорганический вазелин напоминает обычный вазелин, но он не разжи-

Таблица 6

Характеристики электроизоляционного вазелина КВ-3

Характеристики	В исходном состоянии	После 48 *ч* пребывания в среде с относительной влажностью 98%	При температуре 150 °С
Удельное поверхностное сопротивление, *ом*	10^{15}	10^{14}	—
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{15}	10^{14}	10^{14}
Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 1 *Мгц* . . .	2,6	2,6	2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 *Мгц*	0,0010	0,0010	0,0005
Электрическая прочность, *кв/мм* . . .	25	22	21

жается и не густеет при температурах от —80 до +200° С. Он обладает высокими гидрофобностью и адгезией (сцеплением) ко всем материалам. Электроизоляционные свойства его высокие и мало зависят от частоты и температуры (табл. 6).

Вазелин КВ-3 в последнее время широко применяется для защиты поверхности изоляторов от токов утечки, для защиты полупроводниковых приборов и для других целей. Он не вреден и не горит, хорошо сохраняется в закрытых банках. Покрываемую поверхность необходимо очистить и обезжирить, а затем мягким тампоном нанести вазелин в виде тонкой пленки, которая сохраняет свои свойства длительное время как в аппаратуре, так и в условиях наружной атмосферы. В частности, вазелином рекомендуется защищать поверхность опорных и проходных изоляторов антенн и др.

Клеи

В настоящее время разработано большое количество всевозможных клеев на основе фенольно-формальдегидных смол (ВИАМ-Б-3, бакелитовые, БФ-2, БФ-3, БФ-4, БФ-5, БФ-6 и др.), мочевино-формальдегидных (КМ-3 и др.), эпоксидных (из смолы ЭД-5 и ЭД-6 и др.), полиэфирных (АМК) стиролбутилметакрилатных (СБМ и БМА), перхлорвиниловых (перхлорвиниловый), кремнийорганических (ВКТ-3, ИП-9, М-1, КТ-30, М-5), фуриловых смол (Ф и ФЛ), а также на основе каучуков (карбинольный, ГЭН-150/В, термокреоновый и др.) и полиуретанов (ПУ, ПУ-2/10 и др.).

Карбинольный клей хорошо склеивает керамику, стекло, пластмассы, металлы, дерево, кожу, металлы с пластмассами. Склеивание происходит при температуре 15—45° С и давлении 3—5 *кГ/см*². Клей может выдерживать рабочие температуры от —60 до +60° С с сохранением высоких электроизоляционных свойств. Он стоек к действию влаги, минеральных масел, бензина. В качестве катализатора для его отвердения применяется перекись бензоила (1—3%).

Клеи типа БФ широко применяются в радиолюбительской практике. Они обладают хорошими электроизоляционными свойствами, но имеют повышенные потери ($\operatorname{tg} \delta = 0{,}05$).

Клеи БФ-2 и БФ-4 применяются для склеивания металлов, пластмасс, дерева, кожи, стекла и керамики, тканей, металлов с пластмассами, резинами и деревом. Склеиваемые поверхности должны быть очищены от грязи и коррозии и тщательно подогнаны друг к другу. Затем их протирают ацетоном или другим растворителем и высушивают. На склеиваемые поверхности наносят тонкий равномерный слой клея и подсушивают его около 1 *ч* на воздухе или 15 *мин* при температуре 55—60° С. На охлажденные поверхности наносят второй слой клея и подсушивают аналогичным образом, а затем дополнительно в течение 1 *ч* выдерживают при температуре 90° С. Затем детали плотно прижимают друг к другу и в течение 30 *мин* выдерживают при температуре 140—160° С. Клей БФ-4 при сохранении выдержки 2—3 *ч* допускает снижение температуры подсушки и отвердевания до 60° С.

При склеивании деталей клеями типа БФ следует выполнять следующие требования: зазор между склеиваемыми поверхностями должен быть не более 0,05 *мм*; детали из нержавеющей стали должны быть очищены (пескоструйным аппаратом), а из дюралюминия анодированы; удельное давление при склеивании должно быть 5—20 *кГ/см*².

Акриловый клей применяется для склеивания полиметилметакрилата (органического стекла). Он представляет собой раствор органического стекла (2—3 части) в дихлорэтане (97—98 частей). Образуемый шов влагонепроницаем.

Склеиваемые поверхности должны быть плотно подогнаны друг к другу и обезжирены, например, ацетоном. Подготовленные поверхности смачивают дихлорэтаном или ацетоном. Через 1—2 *мин* наносят тонкий слой клея и под давлением около 3 *кГ/см²* склеиваемые детали выдерживают 6—8 *ч*. Образуемый при склеивании шов влагонепроницаем.

Для получения более прочного шва следует применить клей типа БФ.

Термопреновый клей служит для склеивания металлов с резинами. Растворителем этого клея является смесь бензола с бензином в пропорции 2 : 1. Клей влагостоек, виброустойчив и выдерживает рабочие температуры от —40 до +70° С.

Для склеивания металлов с резинами может применяться клей 88. Технология склеивания такая же, как и для резинового клея.

Эпоксидные клеи применяются для склеивания металлов, пластмасс, дерева, стекла и керамики, металлов с пластмассами и деревом. В зависимости от применяемого отвердителя различают клеи холодного и горячего отвердевания. Наибольшее распространение получили клеи холодного отвердевания.

Подготовка склеиваемых поверхностей обычная. Склеивание должно производиться при температуре не ниже 15° С. Перед склеиванием в клей или смолу ЭД-5 или ЭД-6 вводят отвердитель полиэтиленполиамин в количестве 10% и тщательно перемешивают в течение 10 *мин*, при этом необходимо соблюдать меры предосторожности, чтобы отвердитель или неотвердевшая смола не попадала на кожу рук. После введения отвердителя необходимо как можно скорее использовать клей, так как через 1,5—2 *ч* он затвердеет. Склеивание производится при комнатной температуре под давлением 0,5—4 *кГ/см²* в течение 24 *ч*. После этого желательно склеиваемые детали прогреть 4—6 *ч* при температуре 150° С (ЭД-5) или 80—100° С (ЭД-6).

Преимуществом эпоксидного клея является его способность затвердевать равномерно по всему объему.

Прочность клеевого шва не меняется при повышении температуры до 80° С. При дальнейшем увеличении температуры прочность снижается и при 110° С составляет 50% первоначальной величины.

Для склеивания резин с металлами применяется клей «Лейконат».

Полиэфиро-уретановый клей ПУ-2 применяется для склеивания металлов, пластмасс, резин, дерева, керамики и стекла. Клей ПУ-2/10 применяется для склеивания металлов с пластмассами и деревом.

Преимуществом этого клея является широкий интервал рабочих температур (от —80 до +150° С), а также то, что клей сохраняет электроизоляционные свойства в течение длительного времени.

Склеивание неметаллических материалов между собой и с металлами

При склеивании неметаллических материалов между собой и с металлами необходимо учитывать степень адгезии поверхностей двух различных материалов. Кроме того, необходимо учитывать, что

у склеиваемых материалов могут быть различные физические свойства (теплостойкость, коэффициент расширения и др.).

Термопластичные материалы при воздействии некоторых растворителей могут набухать или растворяться и благодаря этому склеиваются без применения специальных клеев. К таким материалам относятся, например, полиметилметакрилат, полистирол, поливинилхлорид и др.

В табл. 7 приведен перечень наиболее распространенных в радиотехнике клеев и указаны материалы, которые ими склеиваются, а в табл. 8 — краткая технология склеивания.

Склеивание полистирола производится так же, как и органического стекла (см. акриловый клей). В качестве клея применяется раствор полистирола в бензоле или ксилоле. Полистирол склеивают под давлением от 3,5 до 7 *кГ/см²* в течение 24—48 *ч* при комнатной температуре.

Склеивание винипласта осуществляется 10—20%-ным раствором перхлорвинила в метиленхлориде или 13%-ным раствором перхлорвинила в дихлорэтане.

Подготовка склеиваемых поверхностей обычная. Перед склеиванием поверхности трижды покрывают тонким слоем клея с промежуточной подсушкой на воздухе в течение 10—15 *мин*. Склеивание производят под давлением около 1 *кГ/см²* в течение 24 *ч*.

При склеивании винипласта с металлами склеиваемые поверхности нужно тщательно очистить (пескоструйным аппаратом) и обезжирить. Затем последовательно наносят три слоя 10%-ного раствора перхлорвинила в метиленхлориде с промежуточной подсушкой первых двух слоев в течение 1—1,5 *ч*; последний слой сушат 16—18 *ч*. Перед склеиванием металлическое изделие нагревают до температуры 130—140° С, соединяют с винипластом при небольшом давлении и выдерживают при этой температуре около 1 *ч*.

Склеивание стекла или керамики между собой и с металлами и пластмассами обычно осуществляется универсальными клеями типа БФ или эпоксидными клеями.

При склеивании материалов на основе каучуков с пластмассами или металлами необходимо подготовить соответствующим образом поверхности и подобрать клей, удовлетворяющий конкретным условиям эксплуатации. В общем случае можно рекомендовать клеи типа БФ, эпоксидные и некоторые другие специальные марки.

Склеивание кремнийорганических резин и материалов на их основе осуществляется с помощью кремнийорганического термостойкого клея КТ-30. Он обеспечивает высокую прочность крепления металлов и резин на основе новых силиконовых каучуков (СКТВ, СКТВ-1 и СКТЭ). Клеевое соединение водостойко и может работать при температурах от —60 до +200° С, допускается кратковременное повышение температуры до 300° С.

Процесс склеивания обычный. Перед склеиванием резины с металлом поверхность металла обрабатывают металлическим песком или наждачной бумагой № 24—36 и обезжиривают растворителем (бензином). Поверхность резины подготавливают обычным способом. Клей наносят тонким ровным слоем и выдерживают на воздухе 5—10 *мин*. Затем склеиваемые поверхности соединяют и выдерживают под нагрузкой (0,2—0,3 *кГ/см²*) в течение 48 *ч* при комнатной температуре. Продолжительность хранения клея КТ-30 около 3 мес.

Электроизоляционные свойства клеев определяются в первую очередь тем полимером или смесью полимеров, на основе которых

Таблица 7

Применение некоторых клеев для склеивания различных материалов

Марка клея	Металлы	Пластмассы	Резина	Дерево	Стекло и керамика	Кожа	Ткани	Металлы с пластмассами	Металлы с резиной	Металлы с деревом	Кремнийорганический каучук и резины	Кремнийорганическая резина с металлом
БФ-2	+	+	—	+	+	+	+	+	+	+	—	—
БФ-4	+	+	—	+	+	+	+	+	+	+	—	—
БФ-3	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
БФ-5	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
БФ-6	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—
ЭД-5	+	+	—	+	+	—	—	+	—	+	—	—
ЭД-6	+	+	—	+	+	—	—	+	—	+	—	—
Эпоксид П	+	—	—	—	—	—	—	+	+	+	—	—
Лейконат	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—
ПУ-2	+	+	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—
ПУ-2/10	—	—	—	—	—	—	—	+	—	+	—	—
Перхлорвиниловый	—	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—
88-Н	—	+	+	—	—	+	—	—	+	—	—	—
Карбинольный	+	+	—	+	+	+	—	+	—	—	—	—
Ф-10	+	+	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—
ФЛ-4	+	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—
КТ-30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+

Примечания: 1. Знак „+" означает, что клей склеивает указанные в столбце материалы.
2. Знак „—" исключает применение клея для склеивания указанных в столбце материалов.

Таблица 8

Краткая технология склеивания неметаллических материалов между собой и с металлами

Марка клея	Консистенция клея	Расход клея, *г/м²*	Количество слоев	Открытая выдержка после нанесения слоя клея, *мин*		Температура открытой выдержки, °C	Удельное давление склеивания, *кГ/см²*	Температура склеивания, °C	Выдержка под давлением, *ч*
				Первого слоя	Последнего слоя				
БФ-2, БФ-3 и БФ-5	Жидкий	150—200	2—3	50—60	60—70	15—90	5—20	130—160	0,5—1,0
БФ-4	Жидкий и пленка	100—120	1	60—70	60—70	15—90	5—20	130—160	0,5—1,0
ЭД-5, ЭД-6	Жидкий	150—200	1	До отлипания	—	15—30	0,5—5	120—150	4—6
Эпоксид П и Пр	Твердый	—	—	—	—	—	0,5—3	180	2
Лейконат	Жидкий	—	1	30—40	—	18—20	—	—	—
ПУ-2	„	—	1	5—10	—	40—45	—	—	—
ПУ-2/10	„	—	1	120	—	15—30	0,2—2,0	20—30	72
Перхлорвиниловый № 1 и 2	„	—	3	60—90	240—300	14—25	—	—	—
Карбинольный	„	—	2—3	60	60	15—25	3—5	15—45	60
88-Н	„	500—600	2	8—10	1—3	18—30	0,2—0,3	18—30	24
ФЛ-4	„	—	2	До отлипания	До отлипания	15—30	2—5	150—160	2
КТ-30	„	—	1	5—10	—	15—30	0,2—0,3	15—30	48

Таблица 9

Электроизоляционные характеристики пленок клеев БФ-2 и БФ-4

Характеристики	Марка клея	После выдерживания в сухой атмосфере		После выдерживания в среде с относительной влажностью 98%	
		1 сутки	3 суток	1 сутки	3 суток
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, *ом*	БФ-2	$2 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^{14}$
	БФ-4	$2 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	БФ-2	$5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{14}$
	БФ-4	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	БФ-2	3,2	3,3	3,5	4,2
	БФ-4	3,0	3,0	3,3	3,8
Тангенс угла диэлектрических потерь . . .	БФ-2	0,09	0,03	0,04	0,03
	БФ-4	0,03	0,03	0,05	0,06

клей изготовлен. Поэтому при выборе клея, который должен обладать определенными диэлектрическими свойствами, необходимо ориентироваться на соответствующие свойства полимера. Помимо того, необходимо учитывать действие влаги, тепла, холода и прочих внешних факторов. В некоторых случаях для выполнения тех или иных условий эксплуатации приходится принимать компромиссные решения. Например, получать прочный клеевой шов или более теплостойкое

Таблица 10

Электроизоляционные характеристики пленки клея ФЛ-4

Характеристики	В исходном состоянии	После 24 *ч* пребывания в воде	При температуре 115 °С
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, *ом*	$1,5 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{14}$	—
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	$4 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{11}$
Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 50 *гц* . .	10,7	7,2	—
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 50 *гц*	0,02	0,1	—
Электрическая прочность, *кв/мм* . . .	130	55	176

Таблица 11

Электроизоляционные характеристики пленки клея Ф-10

Характеристики	При температуре, °С			После 48 *ч* пребывания в среде с относительной влажностью 98%
	+20	+250	—60	
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, *ом*	$2 \cdot 10^{14}$	—	—	$9 \cdot 10^{14}$
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	$1 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{9}$	$7 \cdot 10^{14}$	2.10^{14}
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 *Мгц* .	0,02	0,002	0,02	0,03
Электрическая прочность, *кв/мм*	91	—	—	85

соединение путем применения клея, имеющего худшие электроизоляционные свойства.

В табл. 9, 10, 11 приводятся экспериментальные данные по электроизоляционным свойствам хорошо зарекомендовавших себя пленок из клеев типа БФ, ФЛ, Ф. Хорошими электроизоляционными свойствами обладают пленки клея КТ-30 (табл. 12).

Склеивание металлических колпачков со стеклянными или фарфоровыми трубками при ремонте трубчатых предохранителей осуществляется специальными пастами. Для склейки со стеклянными трубками применяют следующий состав: окись меди — 20%, наждачный порошок № 60 — 20%, жидкое стекло — 60%. Наждачный порошок и окись меди засыпают в жидкое стекло и растирают до получения однородной массы. После склейки детали высушивают в течение двух часов при температуре 100° С с последующей выдержкой

Таблица 12

Электроизоляционные характеристики пленки клея КТ-30

Характеристики	В исходном состоянии	После 48 *ч* пребывания в среде с относительной влажностью 98%	При температуре 200 °С
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	$3 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{12}$
Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 1 *Мгц*	3,6	3,6	3,5
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 *Мгц* . . .	0,0015	0,0046	0,0020
Электрическая прочность, *кв/мм* .	120	44	100

при 20° С в течение 12 *ч*. Такая паста выдерживает температуру до 400° С.

Для склейки металлических колпачков с фарфоровыми трубками применяют смесь равных весов бакелитового лака и наждачного порошка. Сушка производится 2 *ч* при температуре 140—150° С с последующим медленным охлаждением.

Для герметизации приборов в целях защиты от воздействия влаги применяют специальную пасту, состоящую из 43% канифоли (по весу), 22% воска, 22% озокерита, 8% машинного масла и 5% эмалевой краски № 2086. Цвет пасты черный. Для получения защитного цвета достаточно озокерит заменить церезином, а эмаль — густотертой краской типа 4БО в тех же количествах.

Паста готовится нагреванием всех составных частей (кроме краски) до плавления и выдерживается при температуре 130—140° С в течение 1 *ч*.

Краску кипятят отдельно 5—10 *мин* до выделения летучих веществ, затем добавляют к остывшей основной массе и перемешивают.

Целлюлозные материалы

Основным сырьем для изготовления волокнистых органических материалов служат либо растительные волокна (хлопок, лен или специально обработанная древесина), либо синтетические материалы (ацетатный шелк, капрон).

Все органические волокнистые материалы пористы и обладают большой гигроскопичностью. Для обеспечения влагостойкости и сохранения электроизоляционных свойств эти материалы подвергаются пропитке.

Бумага изготавливается из древесины хвойных пород, и в процессе обработки волокна имеют преобладающую ориентацию вдоль движения бумаги. Этим объясняется то, что в поперечном направлении прочность ее ниже, чем в продольном.

Широкое применение получила конденсаторная бумага, которая отличается малой толщиной (от 0,004 до 0,022 *мм*) и повышенной плотностью (1,17—1,25 *г/см*³). Максимальная ее рабочая температура не выше 90—100° С, так как при 110° С происходит ее разрушение. Тщательно высушенная и пропитанная трансформаторным маслом бумага имеет $\varepsilon=3{,}7$, $\operatorname{tg}\delta=0{,}002$, а электрическая прочность ее составляет 12—15 *кв/мм* на частоте 50 *гц*.

Кроме того, выпускается телефонная бумага, толщина которой составляет 0,05 *мм*, а плотность — меньше, чем конденсаторной бумаги. Телефонная бумага может быть различных цветов.

Электротехнический картон отличается от бумаги повышенной толщиной (от 0,1 до 3,0 *мм*). Картон, применяемый для работы в воздушной среде, в зависимости от назначения выпускается трех марок: ЭВ, ЭВС и ЭВТ. Электрическая прочность картона толщиной от 0,1 до 0,5 *мм* после сушки составляет (в зависимости от марки) 11—13 *кв/мм*.

Картоны нашли широкое применение в качестве прокладочного материала при изготовлении катушек трансформаторов, дросселей и др.

Слоистые пластмассы нашли широкое распространение в качестве конструкционных и электроизоляционных материалов. В зависимости от наполнителя различают два основных вида слоистых пластмасс: гетинакс и текстолит.

Таблица 13

Характеристики гетинакса и текстолита

Марка	Плотность, *г/см*³	Теплопроводность, 10^{-4} *кал/сек*×*см·град*	Водопоглощение за 24 *ч*, %	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, *ом*	Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 1 *Мгц*	Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 *Мгц*	Электрическая прочность, *кв/мм*
Гетинакс Ав, Вв, Гв и Дв	1,3	5—8	0,45—0,5	10^{10}—10^{11}	10^{10}—10^{12}	7	0,04—0,06	27
Текстолит поделочный ПТК, ПТ, ПТ-1	1,3	5—8	0,35	10^{11}	10^{11}	5—7	0,02—0,08	5
Текстолит электротехнический Вч	1,3	5—8	0,35	10^{11}	10^{10}	8	0,07	6
Стеклотекстолит КАСТ	1,7	5—8	0,2	10^{13}	10^{14}	5,5	0,03	17
Стеклотекстолит СТК	1,7	6—8	0,35	—	10^{12}	—	0,05 (на частоте 50 *гц*)	10
Стеклотекстолит СТК-41А, СТК-41Б	1,7	6—8	0,35	—	10^{14}	—	0,002	20
Стеклотекстолит СТ-39, СТ-Т . . .	1,5	0,8	1,4	10^{12}	10^{14}	4	0,005	—
Стеклотекстолит СТЭФ	—	6—8	0,1 *г/дм*²	10^{11}	10^{14}	—	0,005 (на частоте 1 *Ггц*)	25
Стеклотекстолит СКМ-1	1,7	3—6	0,6—1	10^{13}	10^{14}	5	0,001	10

Гетинакс — это материал, получаемый методом горячего прессования бумаги, пропитанной фенольными смолами.

Текстолит — это материал, получаемый аналогично гетинаксу, но он состоит из пропитанной ткани. Электроизоляционные свойства гетинакса и текстолита близки, но последний отличается более высокими механическими свойствами.

Гетинакс марок А, Б, В, Вс, Г и Д применяется в аппаратуре, работающей на промышленной частоте (50 *гц*), а марок Ав, Бв, Гв и Дв — в радиоаппаратуре, причем гетинакс Ав применяется в радиоустановках общего назначения, Бв — в телефонных установках, Вв — в высокочастотных и телефонных установках, Гв и Дв — в высокочастотных установках, при этом Дв применяется в основном как панельный материал. Гетинакс всех марок предназначен для работы при температурах от —60 до +105° С.

Для работы в высокочастотной аппаратуре применяется текстолит марки Вч. От гетинакса он отличается повышенной механической прочностью и меньшей влагопоглощаемостью. Он предназначен для работы на воздухе и в радиоаппаратуре при температурах от —60 до +105° С.

Текстолит марок ПТ стоек к действию минеральных масел и бензину, а марки Вч менее стойки к действию минеральных масел.

Стеклотекстолит отличается наименьшей влагопоглощаемостью, лучшими, чем у текстолита, механическими свойствами и может работать при температурах от —60 до +130—180° С.

Стеклотекстолит марок СТ и СТК стоек к действию растворителей, но чувствителен к минеральным маслам и бензину.

В табл. 13 приведены основные характеристики наиболее распространенных в радиотехнике марок гетинакса и текстолита (стеклотекстолита).

Электроизоляционные лакоткани и липкие ленты

Лакоткань — это гибкий эластичный материал, представляющий собой ткань, пропитанную лаком. По виду применяемой ткани различают: светлые и черные хлопчатобумажные лакоткани ЛХС, ЛХЧ; светлые шелковые лакоткани ЛШС; светлые и черные стеклоткани ЛС; кремнийорганические стеклоткани ЛСК.

Черная хлопчатобумажная лакоткань отличается более высокими электроизоляционными свойствами и повышенной влагостойкостью.

Шелковые лакоткани отличаются от хлопчатобумажных меньшей толщиной (до 0,004 *мм*) и применяются в тех случаях, когда при малой толщине необходима повышенная электрическая прочность.

Кремнийорганические лакоткани характеризуются малой зависимостью электроизоляционных свойств от температуры и влаги и могут долго работать при температуре до +180° С, в то время как для хлопчатобумажных лакотканей допускается температура не выше 105° С, а для стеклотканей — не выше 130° С.

В табл. 14 приведены основные характеристики применяемых лакотканей.

Лакоткани широко применяются при изготовлении обмоток, катушек трансформаторов, дросселей и в других изделиях в качестве межслойной и корпусной изоляции.

Липкие ленты на основе стеклоткани и кремнийорганических лаков широко применяются при изоляции катушек или других изделий, когда необходимо сразу же произвести механическое скрепление.

Таблица 14

Характеристики электроизоляционных лакотканей

Характеристики	Хлопчатобумажные		Шелковая ЛШС	Кремнийорганическая, ЛСК
	ЛХС	ЛХЧ		
Удельное объемное электрическое сопротивление, *ом·см*	10^{12}—10^{14}	10^{12}—10^{14}	10^{13}—10^{14}	10^{13}—10^{14}
Относительная диэлектрическая проницаемость на частоте 50 *гц*	4,0—4,6	Около 4	3,8—4,5	3,0—4,2
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 50 *гц* . . .	0,05—0,2	0,03—0,05	0,05—0,08	0 ,03—0,06
Электрическая прочность, *кв/мм* .	20—30	40—60	40—60	40—50

Готовое изделие подвергают термообработке (сушке) при температуре около 180° С и получают монолитную изоляцию с высокой нагревостойкостью.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 10 коп.